

石油地球物理勘探

声阻抗处理中反褶积因子的计算

夏 洪 瑞

摘要

夏洪瑞：声阻抗处理中反褶积因子的计算，《石油地球物理勘探》，21(5)1986：532～541

在声阻抗技术的子波处理中，根据最小平方原理及在有限时窗范围内，用求解托布里兹矩阵方程组来求取反褶积因子的传统方法，可由求解实对称矩阵方程组来替代。文中的理论分析及资料处理实例说明，由于托布里兹矩阵算法采用了截断技术，使原始数据没有得到充分的利用，而且进行斜坡处理的结果，又使 (M_0, M_1) 两端的一部分数据失真。从而影响到了系数矩阵及常数矩阵的精度。而采用实对称矩阵算法求解反褶积因子，则不需要进行斜坡处理，所以数据的使用率及真实性高，求得的反褶积因子比托布里兹矩阵算法在质量上要好。

在计算工作量方面，实对称矩阵算法比托布里兹矩阵算法占用机器的内存量大，花费机时多，但是，为了求取一个精度较高的反褶积因子，我们认为多花费点机时是合算的。

ABSTRACT

Xia Hongrui: The calculation of deconvolution operator in acoustic impedance processing, «OGP», 21(5)1986: 532～541

In wavelet processing of acoustic impedance technique, according to the least square principle and in the case of limited window, the deconvolution operator can be obtained by solving a real symmetric matrix equation system instead of the habitually used Toeplitz matrix equation system. The theoretical analysis and data processing example lead to the conclusion: in Toeplitz matrix algorithm, original data can not be fully used due to truncating, and slope processing makes distortional the original data at the both ends of (M_0, M_1) ; therefore, the accuracy of coefficient matrix and constant matrix can not be ensured. When the real symmetric matrix algorithm is used to solve

for deconvolution operator, slope processing is unnecessary so that higher data utilization rate and higher data reliability can be taken, and obtained deconvolution operator is better than that taken by Toeplitz algorithm.

The real symmetric matrix algorithm needs more internal storage and more computation time than Toeplitz matrix algorithm does; however, we still think it worthy to take more computation time for a better deconvolution operator.

在声阻抗技术的子波处理中, 反褶积因子的求取是极为重要的。然而, 求取一个合适的反褶积因子要涉及到很多因素, 诸如原始资料的质量、参数的选择等。但是, 在相同条件下, 我们认为选择一个正确、合理的计算方法也是非常重要的。为此, 在该项技术的研究中, 我们对反褶积因子的求取方法进行了较深入的探讨。

反褶积因子的求取方法

地震资料的反演通常是以下式为基础的

$$x(t) = \zeta(t) * w(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为地震记录; $\zeta(t)$ 为反射系数; $w(t)$ 为地震子波。

这里, 我们假设干扰信号已在预处理中得到基本消除或影响很小, 故忽略不计。这时, 我们设计这样一个滤波器: 以地震记录为输入, 以测井资料转换出的反射系数为期望输出, 使经过这个滤波器滤波的地震记录的实际输出与期望输出的能量误差为最小, 即

$$Q = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} (x(t) * \bar{w}(t) - \zeta(t))^2 \quad (2)$$

达到最小值。这是一个多元函数求极值问题。要求其极值, 先求偏导数

$$\frac{\partial Q}{\partial w_\tau} = 2 \left(\sum_{t=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{k=-N}^N x(t-k) \cdot \bar{w}(t) - \zeta(t) \right) \cdot x(t-\tau) \right)$$

式中: $\tau = -N, 1-N, \dots, 0, 1, \dots, N$ 。

令 $\frac{\partial Q}{\partial w_\tau} = 0$, 则

$$\sum_{k=-N}^N \bar{w}(t) \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x(t-k) x(t-\tau) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x(t-\tau) \cdot \zeta(t) \quad (3)$$

显然, 式 (3) 是在理想情况下的求解过程, 而实际计算只能在有限的时间段上进行。通常是用一矩形函数 $g(t)$ 乘以 $x(t)$ 、 $\zeta(t)$, 使其在该时间段以内的值保留, 以外的值为零, 即

$$\begin{cases} x'(t) = x(t) \cdot g(t) \\ \zeta'(t) = \zeta(t) \cdot g(t) \end{cases} \quad (4)$$

物理勘探

其中

$$g(t) = \begin{cases} 1 & M_0 \leq t \leq M_1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, M_0 、 M_1 为时窗的起止时间。因此, 从

$$Q' = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} (x'(t) * \bar{w}(t) - \xi'(t))^2$$

出发, 也可以推导出类似于式(3)的线性方程组, 即

$$\sum_{k=-N}^N \bar{w}(t) \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x'(t-k) \cdot x'(t-\tau) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x'(t-\tau) \cdot \xi(t) \quad (6)$$

将式(6)写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} r_{xx'}(0) & r_{xx'}(1) & \cdots & r_{xx'}(2N) \\ r_{xx'}(1) & r_{xx'}(0) & \cdots & r_{xx'}(2N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx'}(2N) & r_{xx'}(2N-1) & \cdots & r_{xx'}(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{w}(-N) \\ \bar{w}(1-N) \\ \vdots \\ \bar{w}(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{x\xi'}(-N) \\ r_{x\xi'}(1-N) \\ \vdots \\ r_{x\xi'}(N) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 $r_{xx'}(\tau')$ 表示地震信号的自相关; $r_{x\xi'}(j)$ 表示地震信号和反射系数的互相关。

式(7)是一个托布里兹系数矩阵, 可以用改进的莱文森递推法求解。在声阻抗技术中常用该式求解反褶积因子。在其它的反褶积方法中, 求解反褶积因子一般也用类似的矩阵。

上面的计算结果带有近似性, 因为时间段 (M_0, M_1) 以外的记录一般不是零值。现对上述算法进行一些改进: 在有测井记录相对应的地震记录道上, 选取信噪比高的一段作为计算时窗, 要使该段上的滤波输出与该段的反射系数的误差能量为最小, 类似于式(6)有

$$\sum_{k=-N}^N \bar{w}(t) \sum_{t=M_0}^{M_1} x(t-k) \cdot x(t-\tau) = \sum_{t=M_0}^{M_1} x(t-\tau) \cdot \xi(t) \quad (8)$$

将式(8)写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} r_{xx}(-N, -N) & r_{xx}(1-N, 1-N) & \cdots & r_{xx}(-N, N) \\ r_{xx}(1-N, -N) & r_{xx}(1-N, 1-N) & \cdots & r_{xx}(1-N, N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}(N, -N) & r_{xx}(N, 1-N) & \cdots & r_{xx}(N, N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{w}(-N) \\ \bar{w}(1-N) \\ \vdots \\ \bar{w}(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{x\xi}(-N) \\ r_{x\xi}(1-N) \\ \vdots \\ r_{x\xi}(N) \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} r_{xx}(k, \tau) = \sum_{t=M_0}^{M_1} x(t-k) \cdot x(t-\tau) \\ r_{x\xi}(k) = \sum_{t=M_0}^{M_1} x(t-\tau) \cdot \xi(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$k, \tau = -N, 1-N, \dots, 0, \dots, N-1, N.$$

式(9)是一个实对称矩阵，用三角形法可求解 $w(t)$ 。这就是改进后的求反褶积因子公式。

两种算法的比较

由式(7)和式(9)的比较可知，用式(9)求解反褶积因子较式(7)占用机器的内存量大，花费机时多。但是，应用式(9)求解的反褶积因子具有精度高的优点。

系数矩阵值的求取及原始数据的使用率

由式(7)和式(9)可知，这两种计算方法的差别在于其系数矩阵及常数项的不同。在式(7)中

$$\begin{aligned} r_{xx'}(\tau') &= \sum_{t=-\infty}^{+\infty} x'(t)x'(t-\tau') \\ &= \sum_{t=M_0}^{M_1} x'(t)x'(t-\tau') \end{aligned} \quad (11)$$

式中 M_0, M_1 为计算时窗的起止时间。上式在形式上虽有无穷项乘积和，但因 $x'(t) = x(t) \cdot g(t)$ ，所以在 (M_0, M_1) 以外的值为零。也就是说，在利用 (M_0, M_1) 以外的 $x(t)$ 值时实际上是以零值参加运算的。很显然，原始记录中这部分信息没有得到合理的应用。若令 $t' = t - \tau'$ ，则式(11)变为

$$r_{xx'}(\tau') = \sum_{t=M_0}^{M_1-\tau'} x'(t)x'(t+\tau') \quad (\tau' = 0, 1, 2, \dots, 2N) \quad (12)$$

由式(12)可见，随着 τ' 的增大， $r_{xx'}(\tau')$ 的乘积求和项则减少，特别是当 $\tau' = 2N$ 时，仅有 $M_1 - M_0 + 1 - 2N$ 项乘积和，若 $M_1 - M_0$ 为 $2N$ ，则仅有一项乘积和。

然而式(9)的系数矩阵是利用式(10)求其系数的，对于 $r_{xx}(-N, N)$ ，则

$$\begin{aligned} r_{xx}(-N, N) &= x(M_0 - N)x(M_0 + N) + x(M_0 + 1 - N)x(M_0 + 1 + N) + \dots + \\ &\quad + x(M_1 - N)x(M_1 + N) \end{aligned}$$

共有 $M_1 - M_0 + 1$ 项乘积和。这里实际上应用了 (M_0, M_1) 以外的实际记录值，因而原始记录信息得到充分应用。对于 $r_{xz}(j)$ 与 $r_{xz}(k)$ 亦有上述相同的结论。由此可知， $r_{xz}(j)$ 与 $r_{xz}(k)$ 是 $r_{xz}(k, \tau)$ 和 $r_{xz}(k)$ 的近似值，式(7)的解是式(10)解的近似值。

斜坡处理与数据的真实性

在求解式(7)过程中，为了使计算能够实现，对 $x(t)$ 进行了截断处理，即在计算 $r_{xz}(j)$ 或 $r_{xz}(k)$ 用到 (M_0, M_1) 以外的值时，是以零值参加运算的。这样，由于数据的突然截断便产生了截断误差^[3]。为消除这种截断误差的影响，通常对 (M_0, M_1) 边缘的数据进行镶边处理，最一般的是采用斜坡处理方法，即用时窗函数 $g'(t)$ 乘以 $x'(t)$ 和 $\zeta(t)$ 。其中

物理勘探

四

$$g'(t) = \begin{cases} i/N & M_0 \leq t \leq M_0 + N - 1 \\ 1 & M_0 + N \leq t \leq M_1 - N \\ (N-i)/N & M_1 - N > t \leq M_1 \end{cases}$$
(13)

式中: $j = 1, 2, \dots, N$; N 为半个反褶积因子点数。

这种处理方法显然破坏了 (M_0, M_1) 两端一部分数据的真实性。

而在式 (9) 中, 仅要求在 (M_0, M_1) 时间段上的误差能量为最小。由式 (10) 可知, 在计算 $r_{ss}(k, \tau)$ 及 $r_{s\zeta}(k)$ 时, 用到了 (M_0, M_1) 以外的实际值, 即 $(M_0 - N, M_1 + N)$ 这一时间段内的数据, 而对于 $(M_0 - N, M_1 + N)$ 之外的数据没有使用。显然这种做法与在式 (11) 计算中强行将 (M_0, M_1) 以外的数据视为零所产生的截断误差影响不同。因此, 在计算式 (10) 时不需要进行斜坡处理, 以保持 (M_0, M_1) 两端原始数据的真实性。因而所求的反褶积因子精度及反演效果都有提高。

图 1 是利用式 (9) 求反褶积因子时作斜坡处理和未作斜坡处理的对比情况。从图中可以看出, 不作斜坡处理求出的反褶积因子能量集中, 波形稳定 ($\bar{w}_1(t)$); 作斜坡处理后求出的反褶积因子波形畸变 ($\bar{w}_2(t)$)。从反演效果上看, $\xi_1(t)$ 与原始反射系数 $\zeta(t)$ 基本吻合, 而 $\xi_2(t)$ 与原始反射系数 $\zeta(t)$ 则不一致, 波形严重畸变。由此说明, 斜坡处理对反褶积因子的精度影响是很大的。

反褶积因子长度的选择

从理论上讲, 反褶积因子是地震子波的逆, 其长度是无限区间。但实际上在求解式 (7) 的托布里兹矩阵时其计算区间不可能从 $-\infty$ 开始到 $+\infty$ 终止, 这样, 便存在一个褶积因子的长度选择问题。当然, 反褶积因子的长度取得越长, 反褶积因子就取得越完整。但是由于计算时窗 (M_0, M_1) 的限制, 决定反褶积因子长度的 N 不可能取得过大。例如, 若取 $N = (M_1 - M_0)/2$, 则由式 (3) 知: (M_0, M_1) 中的每一个数据都要进行

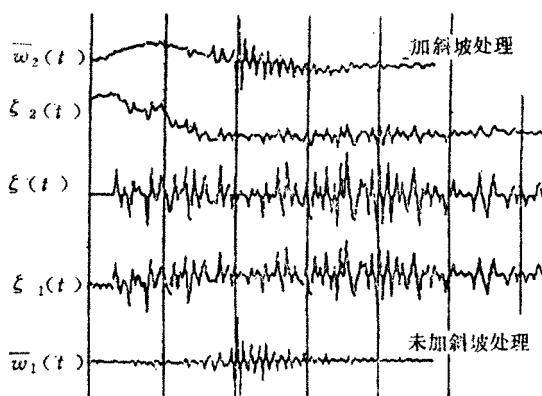


图 1 斜坡处理试验记录

$\bar{w}_1(t)$ 、 $\bar{w}_2(t)$ 分别为未加斜坡处理与加斜坡处理求得的反褶积因子; $\xi_1(t)$ 、 $\xi_2(t)$ 分别为利用 $\bar{w}_1(t)$ 、 $\bar{w}_2(t)$ 求出的反射系数; $\zeta(t)$ 为原始反射系数

斜坡处理, 从而使原始数据严重失真而影响 $r_{s\zeta}(k')$ 、 $r_{s\zeta}(k)$ 的精度。若反褶积因子的长度取得过短, 又可能由于反褶积因子未取完整而影响反演效果。一般反褶积因子的长度最长不得超过计算时窗 (M_0, M_1) 的一半。当时窗不能开得过大时, 就得牺牲反褶积因子的长度来满足这一条件。而应用式 (9) 求解反褶积因子时, 因为不进行斜坡处理, 故反褶积因子长度的选择范围可宽一些, 只要不超过计算时窗 (M_0, M_1) 的长度, 就可以保证反褶积因子的精度。

图 2a 是计算时窗 (M_0, M_1) 为 1052 ms、1552 ms, 反褶积因子分别为 160 ms、240 ms、400 ms、480 ms、560 ms 时, 利用式 (9) 求出不同长度的反褶积因子。图 2b 分

别为图 2a 中反褶积因子的相应反演结果。从图中可以看出，与原始反射系数 $\zeta(t)$ 相比，240ms、400ms 的反褶积因子反演效果为最好，160ms、480ms 的反褶积因子反演效果较差，560ms 的反褶积因子反演结果则波形产生严重畸变。从因子长度与时窗长度之比来看，在比值为 $41/251 \sim 241/251$ 范围内的反演效果较好，其中以 $61/251 \sim 201/251$ 的反演效果为最佳。显然，这个比值范围比式（7）不超过计算时窗长度之半的范围大。特别当计算时窗由于客观原因不能开得过大时，要保证反褶积因子的主要部分取完整，式（9）的优越性就明显超过了式（7）。它可以在保证精度的前提下，尽可能地取全反褶积因子的主要部分，而式（7）的适应面就窄一些。

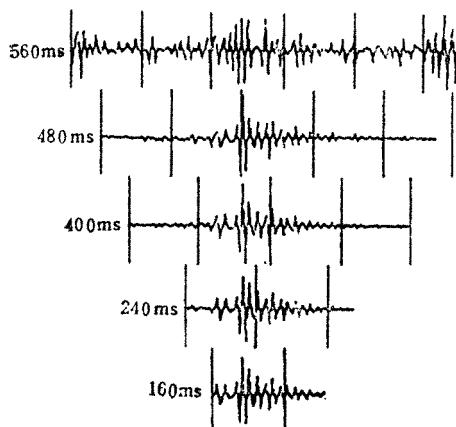


图 2a 利用式(9)计算的不
同长度的反褶积因子

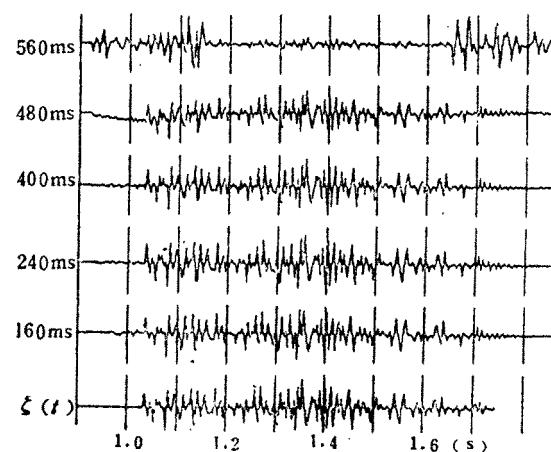


图 2b 中反褶积因子的相应反演效果
 $\zeta(t)$ 为原始反射系数

能量误差范围的估计

我们希望求出的反褶积因子在能量误差估计范围内（即计算时窗 (M_0, M_1) 这一段）及整道记录乃至整条测线上能够取得好的反演效果。根据最小平方原理，要求能量误差的估计范围要尽可能地大一些，但地震及测井记录不可避免的要受到各种干扰的影响，因而整道记录的信噪比不可能都很高。另外，测井记录通常都较短，这些因素均限制了计算时窗不能开得过大。前已叙及，若 $(2N+1)/(M_1 - M_0 + 1)$ 过大，则式（7）的效果差，所以为使反褶积因子主要部分取得全整又不致使 $(2N+1)/(M_1 - M_0 + 1)$ 过大，只有增大 (M_0, M_1) 。显然，这与上述的 (M_0, M_1) 不能开得过大相矛盾。因此，在实际计算中一般采用减少因子点数的办法来解决这一矛盾。这样，反褶积因子的完整性受到了破坏，因而要影响反褶积因子的精度。对于式（9），由于反褶积因子长度的适应范围宽，一般不会出现上述矛盾。

从形式上来看，式（9）是在 (M_0, M_1) 上求取误差能量为最小的反褶积因子，而式（7）则是在 $(-\infty, +\infty)$ 上求取它。但是，由于式（7）对 $x(t), \zeta(t)$ 在 (M_0, M_1) 以外进行了截断处理，所以，实际上也是在 (M_0, M_1) 上进行能量误差估计。

另外，由于在计算式（10）时要用到 (M_0, M_1) 以外各 N 个点的数据，故在选取

(M_0, M_1)时, 必须保证(M_0, M_1)以外各有 N 个非零数据。因而, 应用式(9)的计算时窗比应用式(7)的计算时窗可能要小一些。

综上所述, 我们认为利用式(9)求解反褶积因子数据的使用率高, 真实性强, 求得的反褶积因子精度高。当然, 求解式(9)要占用机器的大量内存和花费较大的计算工作量。但是为了求取一个精度较高的反褶积因子, 多花费点机时也是合算的。

模型分析及应用实例

模型分析

在求取反褶积因子时, 我们在理论上分析了式(9)较式(7)精度高的原因。为了验证这两种方法的效果, 我们以G8井测井资料转换的反射系数 $\zeta(t)$ 与理论子波 $w(t)$ 褶积得到一合成记录 $x(t)$ (图3)。

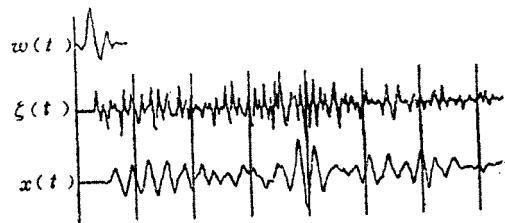


图3 理论模型记录

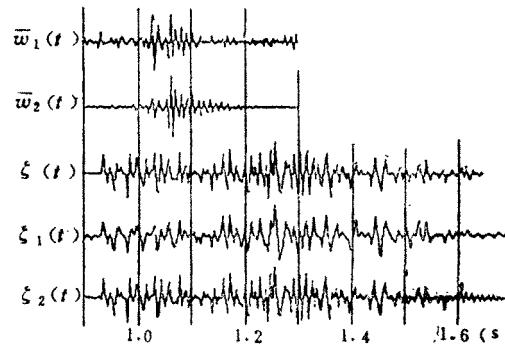


图4 理论模型试验记录

图4中 $\bar{w}_1(t)$ 、 $\bar{w}_2(t)$ 分别是用式(7)和式(9)求取的反褶积因子, $\zeta_1(t)$ 、 $\zeta_2(t)$ 分别为 $\bar{w}_1(t)$ 、 $\bar{w}_2(t)$ 与 $x(t)$ 褶积求取的反射系数, $\zeta(t)$ 为原始反射系数。从图中可以看出, $\bar{w}_2(t)$ 较 $\bar{w}_1(t)$ 能量集中, 收敛性强, 波形比较稳定。从反演效果上看, $\zeta_2(t)$ 与 $\zeta(t)$ 基本吻合, $\zeta_1(t)$ 与 $\zeta(t)$ 在很多部位波形畸变。由此说明, 用式(9)求取的反褶积因子其

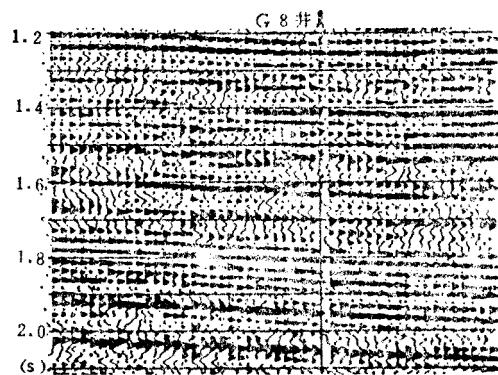


图5a 利用式(9)求取的反褶积因子获得的子波处理剖面

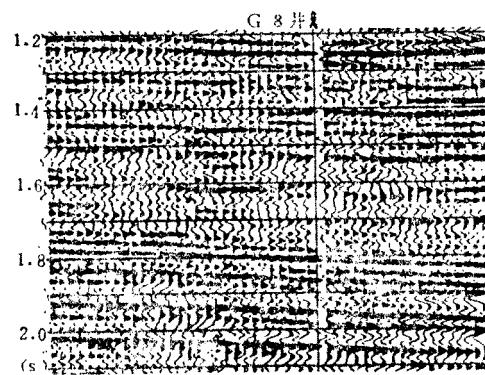


图5b 利用式(7)求取的反褶积因子获得的子波处理剖面

精度及反演效果都明显高于式(7)的结果。

应用实例

根据G8井声波时差测井资料，利用式(9)和式(7)分别求出反褶积因子，然后对7510测线进行了子波处理。图5a是利用式(9)求取的反褶积因子进行子波处理获得的剖面。剖面背景清晰，分辨率高。在1.6s以下的一个反射层位上，同相轴有明显的分叉、合并现象，经G8井钻井资料证实，是砂岩透镜体的反映。

图5b是利用式(7)求取的反褶积因子进行子波处理获得的剖面。该剖面信噪比低，分辨率较差，1.6s以下的砂岩透镜体没有反映出来。

由以上的理论分析和资料处理，证明了求解实对称矩阵方程组较求解托布里兹矩阵方程组在求取反褶积因子时的优越性。但由于声阻抗技术中子波处理涉及的因素很多，我们对一些问题的研究还不够深透，因此，本文可能有许多不妥之处，欢迎批评指正。

这项工作，得到了康寅巧工程师的指导。葛柱、赵永学、周建军等同志参加了这项工作，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 程乾生：《信号数字处理的数学原理》，石油工业出版社，1979
- [2] 查中折：提取子波的一种算法，《石油地球物理勘探》，(4) 1981: 27~36
- [3] 傅才芳：层序反褶积与合成声波测井，《石油地球物理勘探》，(4) 1980: 8~26

(上接第502页)

以上只是少部分的剖面和切片的对比，并且也只是从处理效果上进行的粗浅分析。相信通过对资料的解释和应用，在成果上可能会出现更大的差异，将会更加体现出叠偏速度对三维处理效果的影响程度。

参 考 文 献

- [1] Hubral, P. : Interval velocities from surface measurements in the three-dimensional plane layer case, 《Geophysics》, 41(2)1976
- [2] Shah, P. M. : Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters, 《Geophysics》, 38(5)1973
- [3] Krey, Th. : Computation of interval velocities from common reflection point moveout times for N layers with arbitrary dips and curvatures in three dimension when assuming small shot-geophone distances, 《Geophys. prospr.》, Vol. 24, 1976
- [4] 赵振飞，赵振文：给克雷尔伯特方程补加一个参数，《石油地球物理勘探》，(3) 1980: 38~42